

# PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LAS AGUAS SUPERFICIALES EN LA PENÍNSULA IBÉRICA

Domingo F. RASILLA ÁLVAREZ; Carolina GARMENDIA PEDRAJA  
y Juan Carlos GARCÍA CODRÓN

Grupo de Investigación GIMENA, Dpto. Geografía, Urbanismo y Ordenación del Territorio  
Universidad de Cantabria

domingo.rasilla@unican.es, carolina.garmendia@unican.es, juan.garciacodron@unican.es

## RESUMEN

En este trabajo se analiza el impacto del cambio climático antropogénico sobre los recursos hídricos de la Península Ibérica, aplicando los resultados de cuatro simulaciones procedentes de dos modelos climáticos (HadCM2 y PCM) bajo los escenarios de A2 y B2. Los resultados muestran que la intensidad de dicho impacto dependerá del grado de calentamiento del sistema climático y de las características geográficas de cada cuenca fluvial. No obstante, en líneas generales, se producirá una reducción de la escorrentía superficial, sobre todo en primavera y verano, y un cambio en su distribución mensual, en particular en las cuencas situadas a gran altitud.

**Palabras clave:** cambio climático, impactos hidroclimáticos, Península Ibérica.

## ABSTRACT

This contribution analyzes the impact upon the Iberian water resources of anthropogenic climatic change, using the output from four simulations obtained from 2 CGCM (HadCM2 y PCM) under the A2 and B2 emissions scenarios. Our results show that the magnitude of those impacts will rely on the level of global warming and the geographical characteristics of each watershed, although a reduction of run-off, basically in spring and summer, and a change on the timing of the maximum discharge months, specially in high altitude basins, will be the most remarkable features.

**Key words:** climate change, hydroclimatic impacts, Iberian Peninsula.

## 1. INTRODUCCIÓN

No es una exageración afirmar que la disponibilidad de agua se ha pasado a considerarse uno de los retos fundamentales a los que se enfrentará la humanidad en el futuro. El clima es el input fundamental en un sistema hidrológico, y su variabilidad en el tiempo y en el espacio ejerce consecuencias determinantes en los recursos hídricos de cualquier cuenca hidrográfica. Las últimas investigaciones confirman que la actividad humana está propiciando un aumento de las temperaturas a escala global, que vendrá acompañado de modificaciones en los patrones de circulación y, consecuentemente, de un nuevo reparto espacial y temporal de las precipitaciones.

En consecuencia, uno de los retos más importantes a los que se enfrentan actualmente las investigaciones es evaluar la cuantía de los recursos hídricos a nivel regional y local, y predecir su futura respuesta ante los cambios climáticos. Por ejemplo, se han estimado para toda la Península Ibérica que, ante un escenario relativamente benigno (8% de reducción de la precipitación y aumento térmico de 2,5°C los recursos hídricos sufrirían una reducción media del 17% (AYALA-CARCEDO e IGLESIAS, 2001; CEDEX, 1998; MIMAM, 2005).

En este trabajo realizamos una estimación del impacto causado por los cambios climáticos avanzados por dos modelos bajo diferentes escenarios de emisiones sobre los recursos hídricos, siguiendo dos aproximaciones. Por un lado, un análisis de las transformaciones que experimentará el estado medio de los principales componentes del ciclo hidrológico en la Península Ibérica, comparando la situación actual con las previsiones para el periodo 2071-2100. Posteriormente, se analiza la variabilidad interanual de los caudales bajo las mismas condiciones climáticas en una serie de cuencas fluviales seleccionadas.

## 2. METODOLOGÍA

En esencia, el análisis del impacto de los cambios climáticos en el campo de los recursos hídricos ha seguido dos vías. La primera consiste en la creación de escenarios hipotéticos (básicamente en forma de porcentajes de cambio, en el caso de la precipitación), a partir de los cuales se obtienen los valores futuros de precipitación y temperatura que alimentan los modelos hidrológicos. Este tipo de aproximación ofrece de una manera clara e inmediata la magnitud de la respuesta hidrológica a unas condiciones climáticas concretas, aunque no presenta otras ventajas ya que la evolución de temperaturas y precipitaciones no es independiente, y en muchos casos los cambios propuestos ignoran variaciones más sutiles a escala mensual.

En contraste, los modelos de circulación general de la atmósfera (MCGA) proporcionan resultados físicamente consistentes con el comportamiento del sistema climático. Sus resultados pueden alimentar directamente los modelos hidrológicos, sin embargo, su resolución espacial es insuficiente para obtener proyecciones satisfactorias a escala regional y local. Una primera alternativa son los modelos climáticos regionales (MCR), por su mayor resolución espacial; una segunda consiste en el diseño de procedimientos de reducción de escala (“downscaling”) aplicando un método estadístico que relacione una o varias variables atmosféricas con información climática de superficie. Otra cuestión a resolver es la necesidad de transformar los valores puntuales de temperatura y precipitación, bien de un punto de rejilla, bien de un observatorio clásico, en valores representativos de una cuenca hidrográfica, con, por ejemplo, diferencias sustanciales de altitud, siendo para ello conveniente recurrir a procedimientos geoestadísticos (KNIGHT *et al.*, 2001; CHANG *et al.*, 2002).

Los objetivos y alcance de este trabajo han hecho que se optara por aplicar directamente los parámetros climáticos procedentes de sendas bases de datos, que ofrecen escenarios de cambio climático con una alta resolución espacial, a un sencillo modelo hidrológico basado en el balance hídrico de Thornthwaite (THORNTHWAITE, 1948; MATHER, 1978), diseñado originalmente para estudios agronómicos. Este modelo calcula los diferentes componentes del balance hídrico a escala mensual, teniendo en cuenta tanto las entradas como las pérdidas de agua. La altitud de algunas montañas de la Península Ibérica propicia la caída y acumulación

de la precipitación en forma de nieve, por lo que se incorporaron al modelo sendos coeficientes de niviosidad y retención nival de carácter lineal, que se activan cuando la temperatura media es igual o inferior a determinados umbrales térmicos. Esa agua acumulada se suma al excedente proporcionado por la diferencia entre precipitación y evapotranspiración cuando tiene lugar el deshielo. Igualmente, una parte de la precipitación caída en forma líquida pasa a formar parte directamente del caudal de los ríos; esta fracción de escorrentía directa suele oscilar en torno al 5-10% (WOLOCK and McCABE, 1999). También se simuló la capacidad de infiltración de las precipitaciones en el sustrato, modificando el coeficiente de escorrentía en cada cuenca. Los parámetros necesarios para alimentar el modelo hidrológico son la temperatura media mensual, la precipitación total y la latitud, que nos sirve para el cálculo de la longitud del día.

La capacidad del modelo para simular los caudales de los ríos peninsulares fue calibrada con valores reales (Figura 1). Los resultados finales, teniendo en cuenta la simplicidad con que se representan los procesos hidrológicos, y la suavización de valores climáticos de partida, permiten validar las proyecciones futuras, ya que reproducen tanto el régimen hidrológico (incluso el nival), como su variabilidad interanual, aunque con tendencia a subestimar los caudales más bajos.

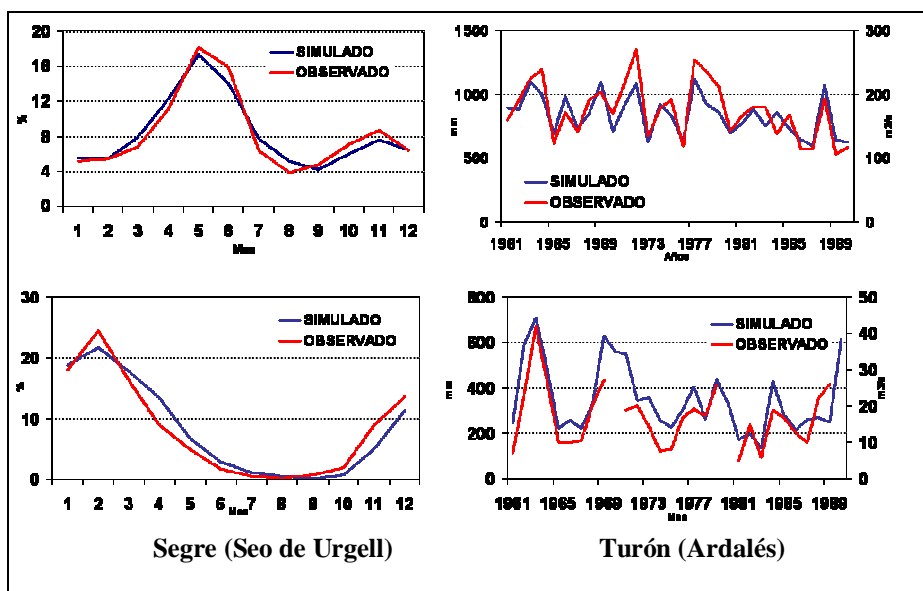


Fig. 1: Régimen fluvial y variabilidad interanual de los caudales observados y simulados bajo las condiciones climáticas actuales (1961-1990)

### 3. FUENTES

Los caudales observados en el periodo 1961-1990 corresponden a siete pequeñas cuencas fluviales de la Península Ibérica (Tabla 1). Su selección estuvo guiada por la ausencia de alteraciones significativas a causa de la actividad humana, un tamaño relativamente pequeño, para que la respuesta hidrológica a las variaciones atmosféricas sea rápida, y el intento de

reflejar la diversidad topográfica y climática de la Península Ibérica. Los datos mensuales han sido obtenidos a través de organismos nacionales (CEDEX -España- y el Instituto de Agua -Portugal-) y de diferentes organismos de cuenca (confederaciones hidrográficas del Norte, Duero, Tajo, Sur, Ebro y Agencia Catalana del Agua).

Nº	Río	Cuenca	Aforo
1	Cares	Norte	Camarmeña
2	Paiva	Costeiras	Castro d'Áire
3	Tajo	Tajo	Trillo
4	Degebe	Guadiana	Amieira
5	Turón	Sur	Ardales
6	Segre	Ebro	Pugcerdá
7	Ginesta	Costera Catalana	Llemana

Tabla 1. CURSOS FLUVIALES SELECCIONADOS

Para la construcción de los escenarios de cambio climático hemos empleado dos bases de datos que proporcionan valores mensuales de temperatura media, amplitud térmica, precipitación, presión de vapor y nubosidad. Los datos actuales proceden de la base CRU TS 1.2 (NEW *et al.*, 2002), mientras que los simulados provienen de la base TYN SC 1.0 (MITCHELL *et al.*, 2004). Su resolución espacial es de (10'), lo que supone más de 3.640 nodos en la Península Ibérica. La última de ellas engloba en realidad otras bases de datos, como un escenario de control (1901–2100) y 16 escenarios con proyecciones climáticas (2001-2100). Estas proyecciones combinan series temporales de calentamiento global y patrones de cambio obtenidos de los MCGA, interpolados desde la resolución original a la rejilla definitiva en base a un procedimiento de triangulación Delaunay, con promedios climáticos (1961-1990) y la variabilidad interanual observada (1901-2000). Las simulaciones están basadas en los resultados de los modelos CGCM2 (Canadá), CSIRO (Australia), DOE PCM (EEUU) y HadCM3 (Reino Unido) bajo los supuestos de cuatro escenarios de emisiones SRES (A1F1, A2, B2, B1).

La construcción de esta base de datos asume que el clima del siglo XXI será esencialmente similar al del periodo 1961-1990, salvo por una tendencia creciente de las temperaturas; en consecuencia, la variabilidad natural del clima futuro será similar a la de dicho periodo. Las nuevas series climáticas fueron construidas de la siguiente manera: para cualquier variable particular (v), modelo climático (g), y escenario (s), el valor (x) en un punto de rejilla particular (i) en cualquier año (y) y mes (m) es el siguiente:

$$x_{vgsim} = c_{vim} + r_{viym} + (p_{vgsim} * t_{gsy})$$

donde (c) es el valor normal de dicha variable en el periodo 1961-1990, (r) es el residuo resultante de normalizar los valores originales con respecto a su promedio 1961-1990 y tras eliminar la tendencia ocasionada por la temperatura global, (p) el patrón de respuesta al forzamiento radiativo (expresado en anomalías con respecto al periodo 1961-1990, por cada grado de cambio en la temperatura global del planeta), y (t) el cambio en dicha temperatura global (relativa al periodo 1961-1990). De los modelos disponibles se eligieron los que

proporcionan los resultados más contrastados, el Had3CM (Hadley Centre Coupled Model versión 3) cálido y relativamente húmedo, y el PCM (National Centre for Atmospheric Research Parallel Climate Model), más fresco y seco. Respecto a los escenarios, se eligieron el A2y el B2, siguiendo las mismas consideraciones.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Variaciones en los recursos hídricos

La evolución de las temperaturas sobre la Península Ibérica proporcionada por ambos modelos bajo los dos diferentes escenarios de emisiones muestra una tendencia creciente que sigue diferentes ritmos, de tal manera que bajo las condiciones impuestas por el más cálido (Had3CM\_A2) el incremento térmico anual podría superar los 8°C a fines del siglo XXI, por sólo 0,6°C del más fresco (PCM\_B2). Los periodos del año más afectados por el aumento de las temperaturas serán el verano y la primavera.

Respecto a las precipitaciones (Figura 2), se augura una reducción de las mismas en toda la Península Ibérica, si bien cada modelo presenta discrepancias en cuanto al volumen total y a su reparto espacial y temporal.

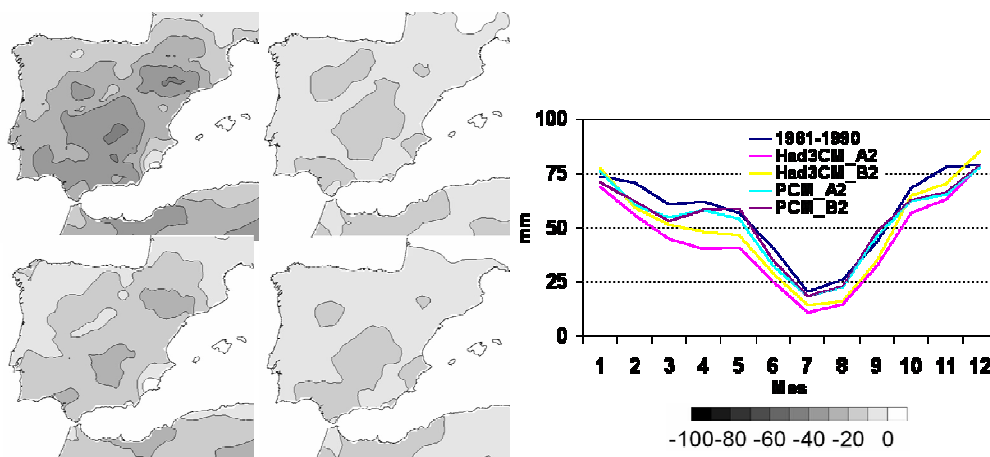


Fig. 2: Variabilidad interanual y patrones espaciales de la precipitación:  
Had3CM\_A2 (arriba, izqda.); Had3CM\_B2 (abajo, izqda.);  
PCM\_A2 (arriba, dcha.) y PCM\_B2 (abajo, dcha.)

El modelo Had3CM ofrece una reducción que oscila entre el 12 (B2) y el 21% (A2) de su cuantía anual, mostrando un gradiente NW-SE en el que destacan las áreas más secas de la Península Ibérica (Valle del Ebro, La Mancha), protegidas por montañas de los flujos húmedos atlánticos y mediterráneos. Las estaciones astronómicas más afectadas por esta reducción serían las equinocciales, con diferencias respecto a los valores actuales del orden del 30% al 45% en abril y mayo; por el contrario, los valores invernales se mantienen, en incluso en el escenario B2 enero y diciembre experimentan un incremento del orden del 10% anual. El

patrón espacial proporcionado por el modelo PCM es, salvando las diferencias de magnitud (descenso inferior al 10% en ambos escenarios), bastante similar al anterior, aunque estima que las precipitaciones disminuirán en el litoral SE mediterráneo, persistiendo, no obstante, la tendencia al aumento de la precipitación invernal. Al igual que en el caso anterior, serían las regiones meridionales las más afectadas por este patrón de retroceso pluviométrico.

La ETP (Figura 3), calculada a partir del método de Thornwaithe, muestra claramente el efecto de la elevación de las temperaturas. Los valores pronosticados por el modelo PCM no son muy diferentes de los actuales, mientras que el modelo Had3CM anuncia un incremento espectacular de los valores de evapotranspiración potencial. Dado que el patrón térmico manifiesta veranos más cálidos e inviernos relativamente moderados, es en los meses estivales dónde se aprecia con más nitidez el contraste con respecto a la situación actual. De la misma manera, la dependencia de las temperaturas determina un patrón espacial en el que los observatorios situados en el interior serán los más afectados por este fenómeno, dependiendo su magnitud del escenario y modelo propuestos.

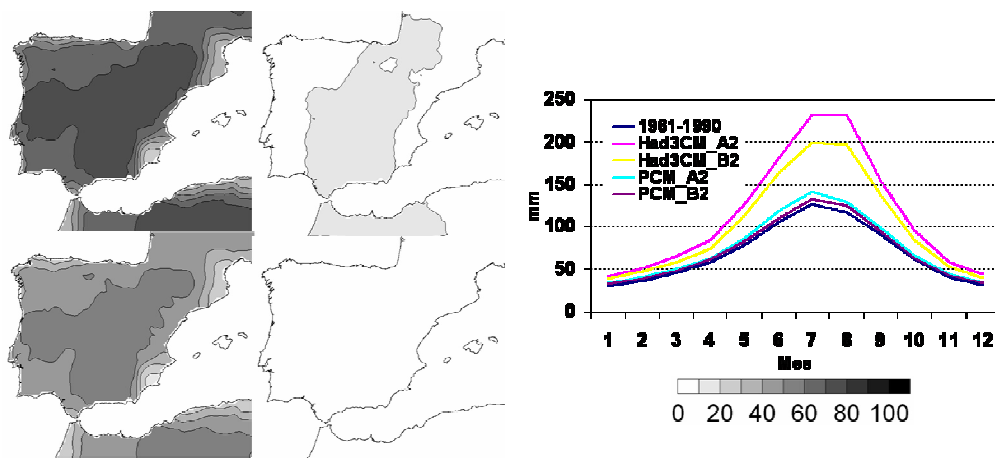


Fig. 3: Variabilidad interanual y patrones espaciales de la ETP:  
Had3CM\_A2 (arriba, izqda.); Had3CM\_B2 (abajo, izqda.);  
PCM\_A2 (arriba, dcha.) y PCM\_B2 (abajo, dcha.)

Finalmente, la reducción de las precipitaciones y el aumento de la evapotranspiración potencial, advierten de una reducción de la escorrentía superficial (Figura 4), más acusada durante el periodo cálido y en aquellos lugares que actualmente poseen excedentes hídricos, esto es, las áreas de montaña. A este respecto, es importante señalar que deben tenerse en cuenta dos aspectos: por un lado, el modelo hidrológico incorpora diferentes capacidades de retención de agua en función del tipo de suelo, litología, etc., pero la imposibilidad de disponer de dicha información nos ha llevado a trabajar con un valor constante de 150 mm (McCABE and WOLOCK, 1999). Por otro, en el cálculo de la escorrentía no interviene directamente la evapotranspiración potencial, sino la real, es decir, la disponibilidad real de agua a partir de los excedentes, únicamente importantes en las áreas de montaña.

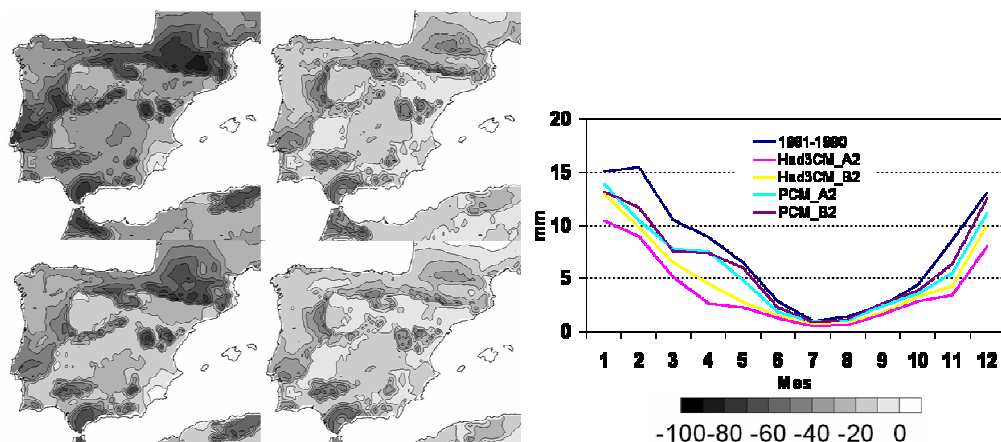


Fig. 4: Variabilidad interanual y patrones espaciales de la escorrentía superficial:  
 Had3CM\_A2 (arriba, izqda.); Had3CM\_B2 (abajo, izqda.);  
 PCM\_A2 (arriba, dcha.) y PCM\_B2 (abajo, dcha.)

#### 4.2 Variaciones de caudal y régimen fluvial

La plasmación regional de las tendencias globales de cada uno de los modelos y escenarios, en combinación con los factores geográficos locales (fundamentalmente, la altitud de la cuenca), explica la diversidad de respuestas hidrológicas (Figura 5).

En cuencas hidrográficas de régimen pluvial, situadas a baja altitud, el régimen actual apenas se verá modificado, ya que las precipitaciones se incorporarán rápidamente al sistema, como ocurre hoy en día. Los ríos atlánticos apenas experimentarán ningún cambio, ya que su alimentación depende de las precipitaciones invernales; los ríos mediterráneos, sin embargo, probablemente experimenten una reducción de los caudales equinociales, sobre todo en primavera, por efecto de la disminución de las precipitaciones. No obstante, en todos ellos, el aumento térmico y, consecuentemente, una mayor evaporación estival provocarán estiajes aún más prolongados, que podrían anticiparse a los meses de mayor y junio, y retrasarse hasta octubre y noviembre.

A medida que ascendamos en altitud, el aumento de las temperaturas supondrá una sustitución de las precipitaciones en forma de nieve y una mayor inestabilidad del manto nival. Por ejemplo, en cuencas de altitud media, como la del Tajo, el alargamiento del máximo invernal hasta abril, señal de cierta influencia nival, irá desapareciendo progresivamente. Algo similar ocurrirá a otras cuencas de mayor altitud, como la del Cares, en la que el máximo nivo-pluvial de mayo será reemplazado por otro invernal. Sólo en los cursos fluviales cuyas cabeceras se sitúan a mayor altitud (Segre) pervivirá una cierta actividad nival, aunque muy atenuada. Como es lógico, y teniendo en cuenta los resultados antes mencionados, el modelo Had3CM apunta hacia transformaciones muy más radicales que el modelo PCM, en el que se mantienen muchos de los rasgos actuales, aunque con menores caudales.

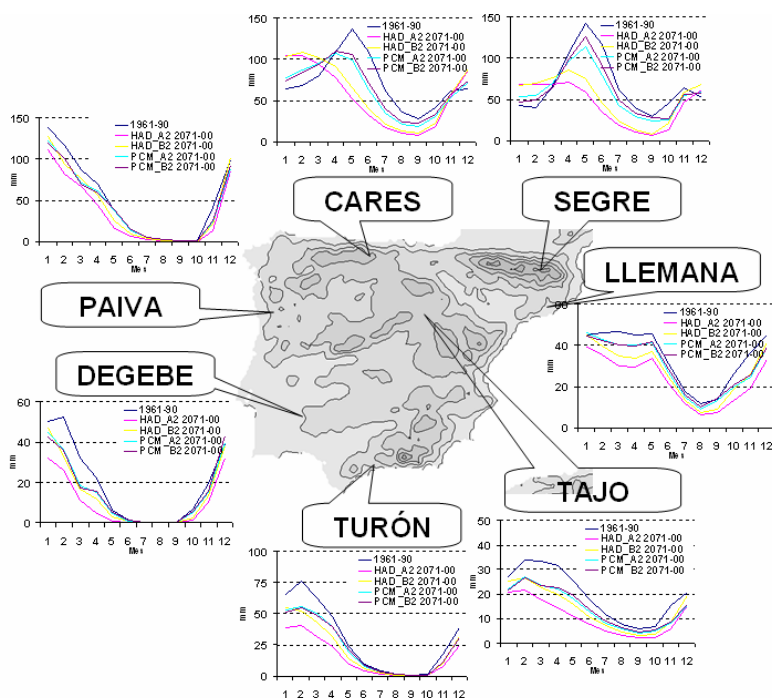


Fig. 5: Variaciones del régimen hidrológico de las cuencas seleccionadas, según los modelos y escenarios de emisión

A pesar que la escala mensual no es la más adecuada para un análisis de eventos significativos, se ha comparado también la probabilidad de excedencia de los caudales mensuales. En líneas generales el aumento de la evapotranspiración favorece una reducción de las probabilidades intermedias (menor disponibilidad hídrica general y estiajes más prolongados). No obstante, la persistencia de meses invernales con precipitaciones abundantes en toda la fachada atlántica ibérica parece conducir a una probabilidad similar de eventos extremos en las cuencas hidrográficas situadas a menor altitud (Figura 6).

Esta situación varía en las cuencas situadas a mayor altitud, donde la disminución de caudales afecta a toda la curva de distribución. Ello no debe, sin embargo, conducir a pensar que el riesgo de avenidas en estos ríos disminuirá en el futuro; a escala diaria, el incremento de las precipitaciones invernales y una mayor temperatura inestabilizará el manto nival, siendo posibles avenidas incluso de una magnitud superior a la actual durante los meses de deshielo.

La nieve es un elemento fundamental del ciclo hidrológico en las montañas de la mitad norte de la Península Ibérica, donde conforma un “pantano” natural que libera progresivamente en primavera la precipitación acumulada en invierno. La fracción de precipitación sólida aumenta progresivamente con la altura de la cuenca hidrográfica (LÓPEZ-MORENO y GARCÍA-RUIZ, 2004); su consecuencia hidrológica es un retraso de los meses de máximo caudal respecto a los de máximas precipitaciones.



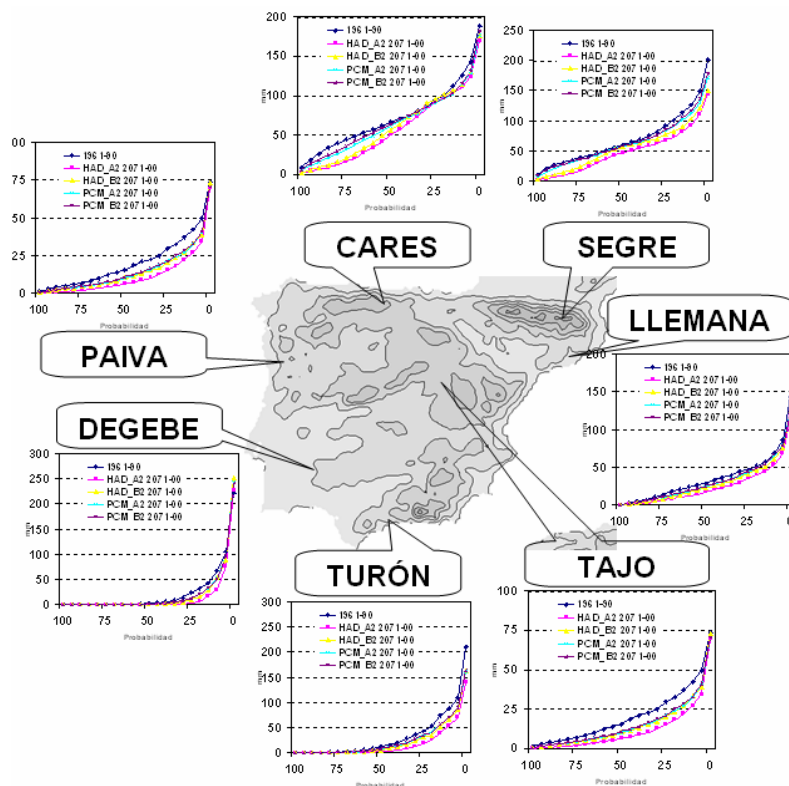


Fig. 6: Variaciones en el régimen hidrológico de las cuencas seleccionadas, según los modelos y escenarios de emisión

A la hora de analizar el impacto que ocasionará el calentamiento global en la nieve, es prioritario señalar que el modelo hidrológico no proporciona espesores reales de nieve, sino simplemente el contenido de agua en forma de nieve, pues el modelo no tiene en cuenta que a medida que avanza la estación invernal, la nieve aumenta su densidad por que el peso de las nuevas nevadas expulsa el aire situado entre los copos. Se observa, de nuevo, (Figura 7) la paulatina reducción de la cantidad de precipitación sólida que entrará dentro del ciclo hidrológico, así como el adelantamiento progresivo del momento de máxima acumulación (actualmente en marzo, pasando a febrero -PCM- y enero -Had3CM) y la menor duración de esta capa de nieve (actualmente no contribuye durante el periodo junio-octubre), particularmente en primavera a causa del aumento de las temperaturas en este periodo del año.

## 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El análisis comparado de la situación actual con los resultados procedentes de dos modelos climáticos y dos escenarios de emisiones permite aproximarnos a las consecuencias que sobre la hidrología peninsular tendrán los cambios climáticos relacionados con el incremento de la concentración de gases invernadero.

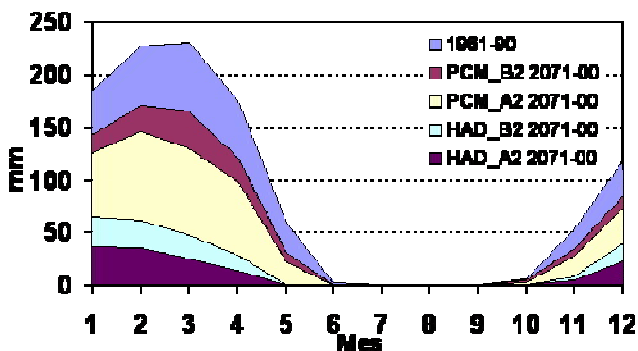


Fig. 7: Proyecciones de contenido de agua en forma de nieve para diferentes modelos y escenarios de emisiones, en el punto de rejilla 54/75 (altura de 2.100 m, cabecera del Segre)

La magnitud de los impactos depende del modelo climático utilizado y del escenario de emisiones aplicado, proponiéndose por ello un abanico de posibles consecuencias hidrológicas.

El previsible calentamiento global supondrá, a escala peninsular, un ciclo hidrológico más dinámico, con aumento de la evapotranspiración potencial, particularmente en los meses más cálidos del año, un descenso de la precipitación anual, aunque con un ciclo más contrastado (inviernos ligeramente más húmedos, primaveras y veranos más secos). La escorrentía superficial disminuirá, sobre todo en los meses de verano y en cuencas como las de alta montaña, el régimen hidrológico tenderá a suavizar sus caracteres nivales.

Además, cabe pensar que, dado que los datos de caudales proceden fundamentalmente de los tramos altos de cada uno de los ríos, los déficits hidrológicos en los tramos medios y bajos se agudizarán, sobre todo en las grandes arterias del interior. En estas zonas, donde se concentra el mayor potencial agrícola y, por tanto, la mayor demanda hídrica, los estiajes serán más largos y agudos por disminución de los aportes de cabecera e incremento de la evaporación in situ, acelerando las pérdidas superficiales y construyendo los recursos subterráneos. Estas tendencias podrán exacerbarse si la respuesta regional al cambio global se manifiesta además por una variación en la frecuencia e intensidad de los patrones de la circulación atmosférica, responsables en último término de la variabilidad climática interanual y de la ocurrencia de fenómenos hidroclimáticos extremos. En este sentido, la bondad de nuestro análisis está limitada por el hecho de que los datos utilizados no contemplan dicha hipótesis. Igualmente, la situación futura podría ser modificada por la incorporación de otros fenómenos que no han sido tomados en cuenta, como cambios en los usos del suelo (BEGUERÍA *et al.*, 2003).

## 6. BIBLIOGRAFÍA

AYALA-CARCEDO, F.J. e IGLESIAS LÓPEZ, A. (2000). "Impactos del posible cambio climático sobre los recursos hídricos, el diseño y la planificación hidrológica en la España peninsular". *El Campo de las Ciencias y las Artes*, BBVA, Madrid.

- BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J.I.; SEEGER, M. y GARCÍA-RUIZ, J.M. (2003). "Assessing the effects of climate oscillations and land-use changes on streamflow in the Central Spanish Pyrenees" *Ambio*, 32 (4), pp. 283-286.
- CEDEX (1998). *Estudio sobre el impacto potencial del cambio climático en los recursos hídricos y demandas de agua de riego en determinadas regiones de España*. Informe técnico para el Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- CHANG, H.; KNIGHT, G.; STANEVA, M. and KOSTOV, D. (2002). "Water resource impacts of climate change in southwestern Bulgaria". *Geojournal*, 57 (3), pp. 159-168.
- KNIGHT, G.; CHANG, H.; STANEVA, M. and KOSTOV, D. (2001). "A simplified basin model for simulating runoff: the Struma river GIS". *The Professional Geographer*, 53 (4), pp. 533-545.
- LÓPEZ-MORENO, J.I. and GARCÍA-RUIZ, J.M. (2004). "Influence of snow accumulation and snowmelt on streamflow in the Central Spanish Pyrenees". *Int. J. Hydrol. Sciences*, 49 (5), pp. 787-802.
- MATHER, J.R. (1978). *The climatic water balance in environmental analysis*. Heath and Company Mass., Lexington.
- McCABE, G.J. and WOLOCK, D.M. (1999). "Future snowpack conditions in the western United States derived from general circulation model climate simulations". *Journal of the American Water Resources Association*, 35, 1473-1484.
- MIMAM (MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE) (2005). *Evaluación Preliminar General de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático*. Madrid.
- MITCHELL, T.; CARTER, T.; JONES, P.; HULME, M. and NEW, M. (2004). *A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901-2000) and 16 scenarios (2001-2100)*. Tyndall Centre for Climate Change Research, Working Paper 55, 30 pp.
- NEW, M.G.; LISTER, D.; HULME, M. y MAKIN, I. (2002). "A high-resolution data set of surface climate for terrestrial land areas". *Climate Research*, 21, pp. 1-25.
- THORNTON, C.W. (1948). "An approach toward a rational classification of climate". *Geographical Review*, 38, pp. 55-94.
- WOLOCK, D.M. and McCABE, G.J. (1999). "Effects of potential climatic change on annual runoff in the conterminous United States". *Journal of the American Water Resources Association*, 35, pp. 1341-1350.